



**EGEM**

électronique – génie électrique – microsystemes

# Matériaux magnétiques en génie électrique 1

*sous la direction de  
Afef Kedous-Lebouc*

*Hermes*

*Lavoisier*

---

## Table des matières

<b>Introduction. Matériaux magnétiques en génie électrique. Récents développements et applications</b> . . . . .	13
Afef KEDOUS-LEBOUC	
<b>Chapitre 1. Physique des matériaux magnétiques</b> . . . . .	17
Olivier GEOFFROY et Horia GAVRILA	
1.1. Introduction . . . . .	17
1.2. Le magnétisme à l'échelle atomique . . . . .	18
1.2.1. Origine du moment magnétique atomique . . . . .	18
1.2.2. Couplage spin orbite et moment résultant de l'atome isolé . . . . .	19
1.2.3. Le magnétisme des atomes liés . . . . .	20
1.3. Phénoménologie du magnétisme des matériaux à l'échelle microscopique . . . . .	24
1.3.1. Le diamagnétisme . . . . .	24
1.3.2. Le paramagnétisme . . . . .	25
1.3.3. Le ferromagnétisme . . . . .	28
1.3.4. Le ferrimagnétisme . . . . .	33
1.3.5. L'anisotrope magnétocristalline . . . . .	35
1.3.6. La magnétostriction et l'énergie magnéto-élastique . . . . .	39
1.3.7. Conclusion . . . . .	44
1.4. Magnétisme des matériaux à l'échelle des domaines magnétiques . . . . .	44
1.4.1. Energie de constitution d'un système aimanté . . . . .	45
1.4.2. Cas de l'ellipsoïde de révolution : anisotropie de forme . . . . .	46
1.4.3. Conséquences sur l'état d'aimantation d'un échantillon : la genèse des domaines . . . . .	48
1.5. Mécanismes d'aimantation à l'échelle macroscopique . . . . .	58
1.5.1. Mécanisme d'aimantation dans les matériaux parfaits . . . . .	58

1.5.2. Aimantation d'un matériau réel.....	61
1.5.3. Comportement dynamique de l'aimantation.....	73
1.6. Conclusion.....	83
1.7. Bibliographie.....	85
<b>Chapitre 2. Aciers électriques non orientés pour machines électriques et autres applications ; progrès récents dans les techniques de caractérisation, les nouvelles qualités de matériaux et les outils de modélisation.....</b>	<b>87</b>
Marc DE WULF, traduit de l'anglais par Afef KEDOUS-LEBOUC	
2.1. Introduction.....	87
2.2. Pertes d'énergie dans les aciers électriques.....	89
2.2.1. Expressions pour l'énergie dissipée P.....	89
2.2.2. Expressions de l'énergie instantanée dissipée p(t).....	91
2.3. Techniques de mesure : pour et contre l'acquisition numérique de données.....	95
2.3.1. Facteur de puissance et facteur de crête.....	96
2.3.2. Influence de la précision de phase.....	98
2.3.3. Influence de l'intermodulation.....	101
2.3.4. Influence de la résolution du convertisseur analogique numérique.....	102
2.4. Nouveaux développements dans les aciers électriques non orientés.....	103
2.4.1. Aciers électriques <i>fully process</i> .....	106
2.4.2. Aciers électriques <i>semi-process</i> .....	108
2.4.3. Qualités d'aciers électriques avec perméabilité plus élevée et pertes plus faibles.....	110
2.4.4. Qualités aciers électriques avec une conductivité thermique améliorée.....	117
2.4.5. Magnétit pour les applications de blindage électromagnétique.....	121
2.5. Avancées dans la modélisation des aciers électriques dans les machines asynchrones.....	122
2.5.1. Effets des conditions magnétiques et mécaniques spécifiques.....	123
2.5.2. Pertes électromagnétiques.....	138
2.5.3. Application à la machine asynchrone fonctionnant à vide.....	144
2.6. Remerciements.....	148
2.7. Bibliographie.....	148
<b>Chapitre 3. Matériaux magnétiques doux spéciaux et applications.....</b>	<b>153</b>
Thierry WAECCKERLE	
3.1. Définition et problématique des matériaux magnétiques doux spéciaux.....	153
3.1.1. Les besoins du génie électrique : relations générales entre applications et famille de matériaux.....	154
3.1.2. Coût des matériaux magnétiques doux semi-finis : une grande diversité de prix.....	158
3.2. Les alliages FeNi.....	161
3.2.1. Diversité et hautes perméabilités des alliages FeNi : principales caractéristiques et évolutions récentes.....	161
3.2.2. Exemple n° 1 d'application : le moteur pas à pas, type LAVET, utilisé en horlogerie.....	166
3.2.3. Alliages pour transformateur de modem bas débit ( $\leq 56$ kbits/s).....	173
3.2.4. Blindage passif à haute atténuation.....	178
3.2.5. Les capteurs magnétiques de courant continu : précision et FeNi vont de paire.....	192
3.2.6. Alliages magnétiques pour régulation en température du flux magnétique (aimants), des pertes magnétiques (cuison par induction).....	199
3.3. Aciers et aciers spéciaux.....	204
3.3.1. Aciers inoxydables ferritiques : résistance à la corrosion + ferromagnétisme.....	204
3.3.2. Aciers bas C.....	205
3.3.3. Aciers de construction.....	206
3.3.4. Aciers <i>marketing</i> .....	207
3.4. Alliages semi-rénanants.....	207
3.5. Alliages FeCo doux.....	208
3.5.1. Les bienfaits et méfaits du cobalt dans les alliages magnétiques ; alliages industriels actuels.....	209
3.5.2. Les alliages commerciaux historiques : la maturité industrielle.....	211
3.5.3. Les alliages Fe-bas %Co type Fe18 %Co-0.5 %Si (AFK18).....	214
3.5.4. Alliages Fe-bas %Co à grains orientés pour transformateur embarqué basse fréquence (matériaux en développement).....	216
3.5.5. Nouveaux alliages AFK502HLE pour génératrices aéronautiques et actionneurs plus puissants, plus rapides, plus légers, plus faibles.....	219
3.5.6. Alliages pour actionneurs électromagnétiques, compacts et à grande dynamique : exemple des actionneurs <i>camless</i> (souppes électromagnétiques).....	220
3.6. Bibliographie.....	223
<b>Chapitre 4. Alliages magnétiques doux enrichis en silicium.....</b>	<b>227</b>
Jacques DEGAUQUE et Fausto FIORILLO	
4.1. Introduction.....	227
4.2. Le diagramme d'équilibre et les phases ordonnées des alliages Fe-Si ferromagnétiques.....	228
4.3. Elaboration et morphologie des alliages enrichis en silicium.....	232
4.3.1. La solidification rapide sur roue froide.....	232

12 Matériaux magnétiques en génie électrique 1

4.3.2. Morphologie et microstructure des rubans rapidement solidifiés . . . .	237
4.3.3. Enrichissement en silicium de tôles industrielles Fe-Si par CVD. . . .	242
4.3.4. Morphologie et microstructure des alliages enrichis par CVD . . . .	245
4.3.5. Autres procédés d'élaboration . . . . .	248
4.4. Propriétés physiques. . . . .	249
4.4.1. Propriétés magnétiques . . . . .	249
4.4.2. Propriétés mécaniques . . . . .	269
4.5. Applications des alliages Fe-Si enrichis en silicium. . . . .	279
4.5.1. Transformateurs . . . . .	281
4.5.2. Moteurs . . . . .	283
4.5.3. Convertisseurs de puissance . . . . .	284
4.6. Conclusion . . . . .	285
4.7. Bibliographie. . . . .	286
<b>Index</b> . . . . .	<b>293</b>

**GÉNIE ÉLECTRIQUE**

Le traité Electronique, Génie Electrique, Microsystèmes répond au besoin de disposer d'un ensemble de connaissances, méthodes et outils nécessaires à la maîtrise de la conception, de la fabrication et de l'utilisation des composants, circuits et systèmes utilisant l'électricité, l'optique et l'électronique comme support.

Conçu et organisé dans un souci de relier étroitement les fondements physiques et les méthodes théoriques au caractère industriel des disciplines traitées, ce traité constitue un état de l'art structuré autour des quatre grands domaines suivants :

Electronique et micro-électronique

Optoélectronique

Génie électrique

Microsystèmes

Chaque ouvrage développe aussi bien les aspects fondamentaux qu'expérimentaux du domaine qu'il étudie. Une classification des différents chapitres contenus dans chacun, une bibliographie et un index détaillé orientent le lecteur vers ses points d'intérêt immédiats : celui-ci dispose ainsi d'un guide pour ses réflexions ou pour ses choix.

Les savoirs, théories et méthodes rassemblés dans chaque ouvrage ont été choisis pour leur pertinence dans l'avancée des connaissances ou pour la qualité des résultats obtenus.

**Hermes**  
**Science**  
— publications —

[www.hermes-science.com](http://www.hermes-science.com)

ISBN 2-7462-1165-3



9 782746 211650